ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT







УДК 004.032.26, 531.3:625.7
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-285-292

Научная статья



Решение задачи определения механических свойств материалов дорожных конструкций с использованием нейросетевых технологий

Н. Е. Бабушкина ✉, **А. А. Ляпин**
Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ copybird@yandex.ru

Аннотация

Введение. Определение механических свойств слоистых конструкций автомобильных дорог является актуальной задачей. Это обусловлено, во-первых, необходимостью контроля качества новых участков при строительстве автомагистралей. Во-вторых, представляет интерес оценка состояния действующих дорог при накоплении повреждений и дефектов. Образование множественных дефектов (трещин) меняет осредненные вязкоупругие свойства составляющих конструкции, особенно поверхностных асфальтобетонных слоев. В статье рассматривается использование нейросетевых технологий для повышения точности восстановления вязкоупругих свойств. Данный подход базируется на экспериментальных методах. В качестве примера можно привести определение динамического прогиба конструкции от падения груза (англ. determining the dynamic deflection of a structure from a falling weight, FWD).

Материалы и методы. На основе нейронной сети определены модули упругости трехслойной конструкции. Для выяснения точности решения его сопоставили с результатами математического моделирования и экспериментальными данными.

Результаты исследования. Экспериментальные и расчетные показатели модулей упругости отдельных слоев дорожной конструкции оказались очень близкими. Предложенный подход к определению механических свойств материалов дорожных конструкций позволяет применить полученные результаты для определения состояния отдельных элементов и всей дорожной конструкции.

Обсуждение и заключения. Показана перспективность использования искусственного интеллекта для определения механических свойств слоистых конструкций. Дальнейшее совершенствование методов и средств анализа поведения дорожной конструкции при динамическом нагружении позволит расширить существующие подходы к оценке состояния дорожных конструкций.

Ключевые слова: нейронная сеть, неразрушающий контроль, модуль упругости, регрессионный анализ, многослойная сеть, ударное вдавливание, нейросетевые технологии.

Благодарности. Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку исследования.

Финансирование. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22–29–01259, https://rscf.ru/project/22-29-01259/

Для цитирования. Бабушкина, Н. Е. Решение задачи определения механических свойств материалов дорожных конструкций с использованием нейросетевых технологий / Н. Е. Бабушкина, А. А. Ляпин // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 3. — С. 285–292. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-285-292

Original article

Solving the Problem of Determining the Mechanical Properties of Road Structure Materials Using Neural Network Technologies

Natalia E. Babushkina ✉, **Alexandr A. Lyapin**
Don State Technical University, 1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ copybird@yandex.ru

Abstract
Introduction. Determination of mechanical properties of layered structures of highways is an urgent task. This is due, firstly, to the need to control the quality of new sections during the construction of highways. Secondly, to assess the condition of existing roads with the accumulation of damage and defects is of interest. The formation of multiple defects (cracks) changes the averaged viscoelastic properties of the components of the structure, specifically, the surface asphalt-concrete layers. The article discusses the use of neural network technologies to improve the accuracy of the recovery of viscoelastic properties. This approach is based on experimental methods. As an example, we can give the definition of the dynamic deflection of a structure from a falling weight, FWD.
Materials and Methods. The elastic modulus of a three-layer structure was determined on the basis of a neural network. To find out the solution accuracy, it was compared to the results of mathematical modeling and experimental data.
Results. The experimental and calculated parameters of the elastic modulus of individual layers of the road structure turned out to be very close. The proposed approach to determining the mechanical properties of materials of road structures allowed us to apply the obtained results to examination of the condition of individual elements and the entire road structure.
Discussion and Conclusions. The prospects of using artificial intelligence to determine the mechanical properties of layered structures was shown. Further improvement of methods and tools for analyzing the behavior of road structures under dynamic loading will expand existing approaches to assessing the condition of road structures.

Keywords: neural network, non-destructive testing, modulus of elasticity, regression analysis, multilayer network, impact indentation, neural network technologies.

Acknowledgments. The authors express their gratitude for the financial support of the research.

Funding information. The work was done on RFFI grant no. 22–29–01259, https://rscf.ru/project/22-29-01259/

For citation. N. E. Babushkina, A. A. Lyapin. Solving the Problem of Determining the Mechanical Properties of Road Structure Materials Using Neural Network Technologies. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 285–292. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-285-292

Введение. Оценка состояния дорожных конструкций позволяет прогнозировать процесс эксплуатации дорог, планировать сроки и объемы ремонтно-восстановительных мероприятий, влиять на эффективность и безопасность работы автомобильного транспорта. Активно задействуются методы неразрушающего контроля[1]. В ряде научных работ [1, 2] авторы отметили надежность и экономичность такого подхода. К неразрушающим относится определение динамического прогиба конструкции от падения груза (метод ударного нагружения, FWD, от англ. determining the dynamic deflection of a structure from a falling weight). Данный подход предполагает регистрацию чаш прогиба поверхности дорожной конструкции на определенном расстоянии от точки приложения ударного воздействия. При этом в ходе работы установки рассчитываются модули упругости слоев, определяются нагрузка и толщина слоев конструкции.

Одна из основных целей научных изысканий в этом направлении — обеспечить своевременное обнаружение дефектов и изменений в компонентах дорожных конструкций. Исследователи установили фактор, сильнее других влияющий на главные характеристики динамического напряженно-деформированного состояния системы «дорожная конструкция — грунт». Это изменение динамических модулей упругости элементов дорожного покрытия, основания и грунта [3–5][2].

[1] Еремин Р. А., Кулижников А. М., Пудова Н. Г. Методика комплексного обследования дорожной одежды автомобильных дорог с применением методов неразрушающего контроля // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : мат-лы 16-й общерос. науч.-практ. конф. изыскательских организаций / ООО «Геомаркетинг», ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве», Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве», Общероссийское отраслевое объединение работодателей Союз изыскателей. М. : Геомаркетинг, 2021. С. 438–446.
[2] Qinwu, X. Development of a Computational Method for Inverting Dynamic Moduli of Multilayer Systems with Applications to Flexible Pavements under FWD Tests : dis. … doc. of philos. Texas, 2014. 223 p.

Альтернативным инструментом для контроля состояния дорожных покрытий может быть нейронная сеть, обученная по результатам экспериментов [6, 7]. Стоит отметить широкое применение нейронных сетей в области строительства, в том числе дорожного. Нейронные сети — эффективное средство для решения некоторых задач классификации, в том числе строительных. С их помощью можно выполнить и регрессионный анализ. Традиционный подход к построению нелинейных моделей имеет ряд ограничений. Они связаны, во-первых, со сложными, скрытыми нелинейными связями исходных данных. Во-вторых, с течением времени возможна модификация структуры связей, что обусловливает необходимость трансформации структуры нелинейной модели. Использование нейросетевых технологий позволяет устранить недостатки традиционного подхода. Нейронная сеть способна самостоятельно определять функциональные зависимости, с заданной точностью аппроксимировать нелинейные функции, перестраивать свою архитектуру в процессе обучения. Вышеизложенное подтверждает актуальность представленной работы.

Нейросетевые технологии открывают новые возможности для решения задач проектирования, оптимизации и диагностики строительных конструкций [8–11]. О. М. Максимова пишет, что возможности дообучения нейронной сети позволяют совершенствовать строительную конструкцию, улучшать ее управление [12]. В [13] отмечается, что искусственный интеллект может снизить издержки компаний, благодаря своевременной диагностике строительных объектов. В [14] представлен широкий обзор возможностей применения нейронных сетей в строительстве. Автор отмечает многовариантность использования искусственного интеллекта для решения множества сложных нелинейных задач прогнозирования, оценки, оптимизации.

В [15] особое внимание уделяется качеству и состоянию дорожной сети. На основе экспериментальных данных сравниваются две модели: многомерный анализ и искусственная нейронная сеть. Их разработали для создания системы поддержки принятия решений при оценке эксплуатационного состояния дорог в связи с гидрогеологической обстановкой. Автор делает вывод о большей надежности и эффективности нейросетевой модели.

Отдельно стоит сказать о выборе типа нейронной сети. Авторы [16] приходят к выводу, что тип нейронной сети существенно не влияет на решение задачи расчета модуля упругости слоев дорожного покрытия. При этом наиболее схожие результаты между моделью и целевыми значениями обеспечила модель нейронной сети с прямой связью.

Цель исследования — решение задачи обратного расчета модулей упругости по чашам динамических прогибов от ударного воздействия установкой FWD. Сравниваются результаты:

– моделирования динамического воздействия на дорожную конструкцию;

– полученные нейронной сетью.

Материалы и методы. С помощью программы расчета волновых полей в конструкции смоделировано динамическое воздействие от установки FWD. Используемую при расчете модель осесимметричной деформации среды аналитически можно описать как многослойное полупространство D, состоящее из N слоев в цилиндрической системе координат (R, θ, Z). Ось симметрии OZ направлена вертикально вверх и ортогональна граничной плоскости полупространства и его слоев (рис. 1).

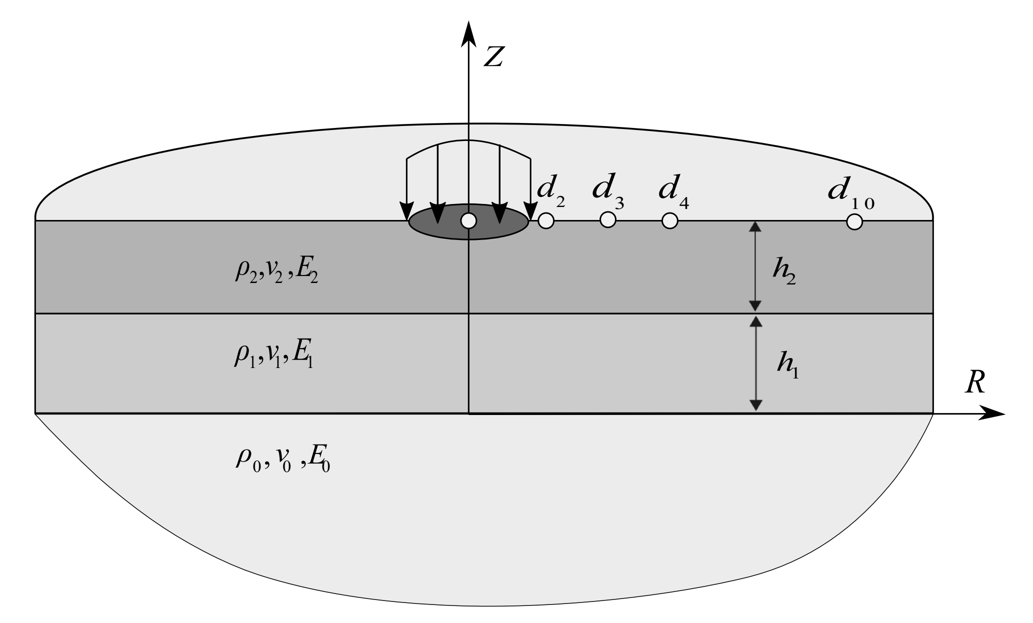


Рис. 1. Многослойная конструкция дорожной одежды в продольном разрезе

Движения среды описываются динамическими уравнениями Ламе в перемещениях для однородного линейно-упругого материала в пределах каждого слоя:

$$(\lambda + 2\mu)\,\mathrm{grad\,div}\,u(r,t) \;-\mu\,\mathrm{rot\,rot}\,u(r,t) \;= \rho\ddot{u}(r,t)\,, \tag{1}$$

где $u = (u_R,\ u_Z)$ — вектор перемещений, r — радиус-вектор точки наблюдения, λ, μ — упругие коэффициенты Ламе, ρ — плотность материала.

Слои полупространства D жестко скреплены между собой. При переходе через плоские границы раздела требуется совпадение векторов перемещений и напряжений (σ_z, τ_{zr}).

Каждый слой полупространства обладает следующими характеристиками: толщина h_i, плотность ρ_i, модуль упругости $E_i = \mu_i \frac{3\lambda_i+2\mu_i}{\lambda_i+\mu_i}$, коэффициент Пуассона $\nu_i = \frac{0{,}5\,\lambda_i}{\lambda_i+\mu_i}$.

Граничные условия для вектора напряжений $s = (\sigma_z, \tau_{zr})$ на верхней границе многослойной среды D, распределенного по пятну радиуса r_0 контакта колеса и дорожной конструкции, можно записать:

$$\sigma_z(R,t) = \begin{cases} P_0 sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), t \in [0,\tau] \\ 0, t > \tau \end{cases}, \ \tau_{zr} = 0, \tag{2}$$

где P_0 — постоянная интенсивность ударного нагружения длительностью τ.

Для решения задачи используется интегральное преобразование Ханкеля по радиальной координате Фурье и по времени. В результате получено представление волнового поля:

$$u(r,t) = \int_0^\infty d\omega exp(-i\omega t) \int_0^\infty Q(u,\omega)\cdot S(u,\omega) J_{0,1}(uR) u du. \tag{3}$$

Здесь $S(u,\omega)$ — преобразование Фурье — Ханкеля от вектора внешней нагрузки s; $Q(u,\omega)$ — матрица-функция Грина для многослойного полупространства, полученная с использованием принципа суперпозиции в виде суммы матриц для однородного полупространства, как в [4].

Для анализа свойств конструкции при решении обратной задачи используются результаты экспериментальных измерений чаши динамических прогибов в заданных точках наблюдения на поверхности $R = d_k$, $k = 1, 2, ..., 10$. Среднее расстояние между ними — 0,3 м. Измеряемая характеристика в каждой точке на поверхности:

$$\underset{t}{max}\, |u_z(d_k,t)|.$$

На рис. 2 — пример поведения функций вертикальных прогибов по времени для типовой трехслойной конструкции автодороги.

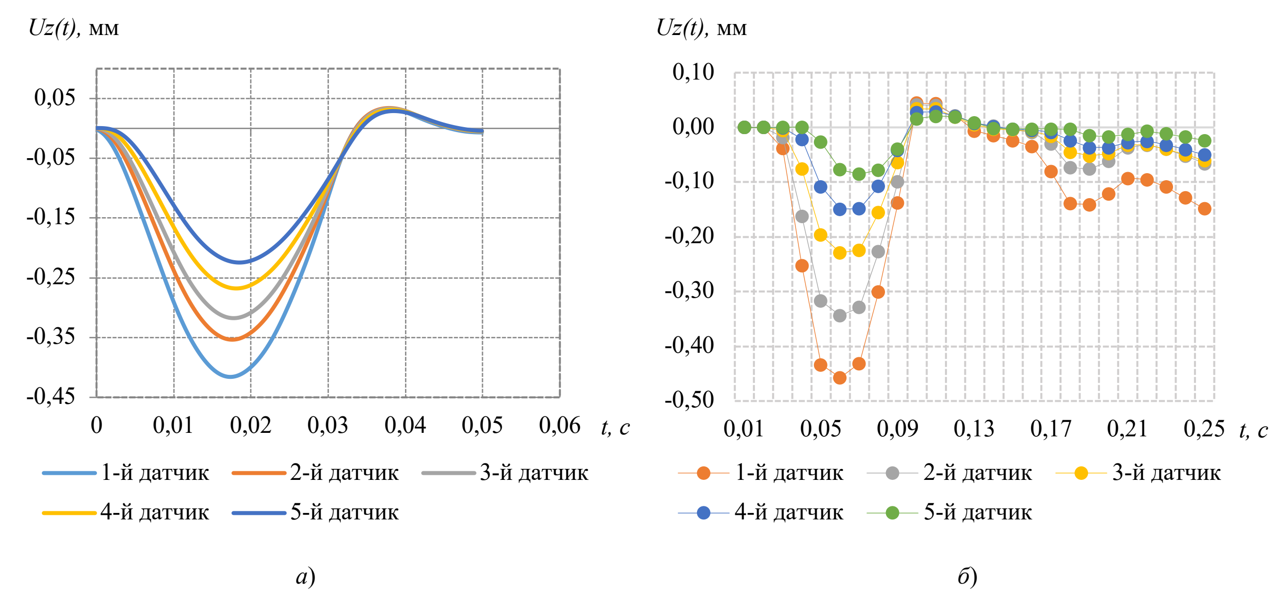


Рис. 2. Временные зависимости вертикальных прогибов $u_z(d_k,t)$: *а* — данные моделирования; *б* — данные эксперимента

Процедура восстановления модулей упругости конструкции E_i основывается на минимизации квадратичной функции ошибки:

$$F(E_i) = \sum_{k=1}^{10}\left(\xi_k(E_i) - \xi_k^{exp}\right)^2,$$

где ξ_k^{exp} получены из эксперимента с использованием установки FWD. В качестве алгоритма минимизации выбрали метод Левенберга — Марквардта. Элементы градиента и матрицы Гессе функции F вычисляются

конечными разностями 1-го порядка. При этом контролируется выход модулей упругости E_i за рамки физических диапазонов изменения этих параметров.

Для решения задачи с помощью нейронных сетей рассмотрена типовая конструкция дорожной одежды (таблица 1).

Таблица 1

Конструкция дорожной одежды эксперимента

Конструктивные элементы	Толщина, см	Границы модуля упругости, МПа	
		верхняя	нижняя
Асфальтобетонный слой	10	4200	1200
Щебеночный слой	44	1500	100
Грунт	∞	300	20

В таблице 1 представлены основные конструктивные элементы исследуемого участка дороги. Отметим, что модель построена с максимальным показателем модуля упругости (4200 МПа), так как экспериментальные результаты измерений привязаны к средней температуре воздуха 20 °C. Для определения модулей упругости в зимний период необходим перерасчет показателей.

Полносвязную нейронную сеть реализовали на языке Python с использованием библиотеки глубокого обучения Keras. Основные параметры сети:

– 300, 30, 3 нейронов в слоях;

– 3000 эпох обучения.

Функция активации в скрытых слоях — ReLu, в выходном слое — sigmoid. Сеть работает с нормированными данными в диапазоне от 0 до 1. После вычислений сети производится денормализация в числовой вид. Нейронная сеть обучалась на полученном при моделировании наборе данных из 1000 значений. В среднем погрешность вычислений нейросети на тестовом множестве находится в пределах 10 %.

Входы нейронной сети — чаши динамических прогибов. На рис. 3 они показаны при различных модулях упругости слоев дорожной конструкции. Выходы сети — значения модулей упругости конструктивных элементов дорожной одежды.

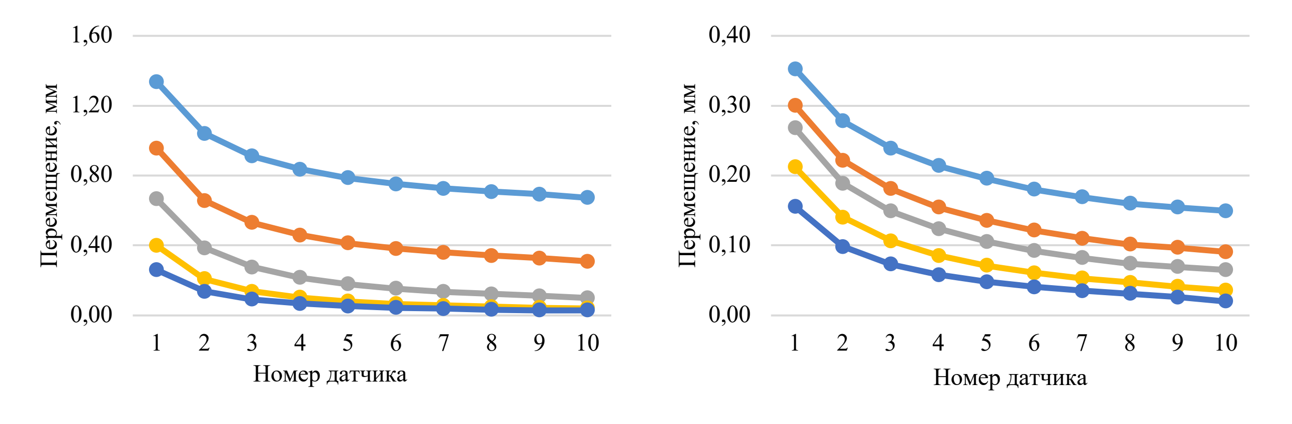


Рис. 3. Чаши динамических прогибов при различных модулях упругости

Экспериментальные данные для исследования получили с помощью установки FWD на участке дороги с толщиной асфальтобетонного покрытия 10 см и толщиной щебеночного слоя 44 см. Определены модули упругости слоев дорожных одежд (таблица 1). Схема размещения датчиков-геофонов: 0 — 20 — 30 — 45 — 60 — 90 — 120 — 150 — 180 — 210 см от точки ударного воздействия.

Результаты исследования. Авторы рассмотрели различные варианты сочетания конструктивных элементов:

– асфальтобетонный + щебеночный слой;

– асфальтобетонный слой + грунт;

– щебеночный слой + грунт;

– асфальтобетонный + щебеночный слой + грунт.

Рассмотрим визуализации итогов вычислений нейронной сети. На рис. 4 изображены результаты, полученные нейронной сетью при тестовом расчете для 1-го варианта. Точность вычислений превысила 90 %.

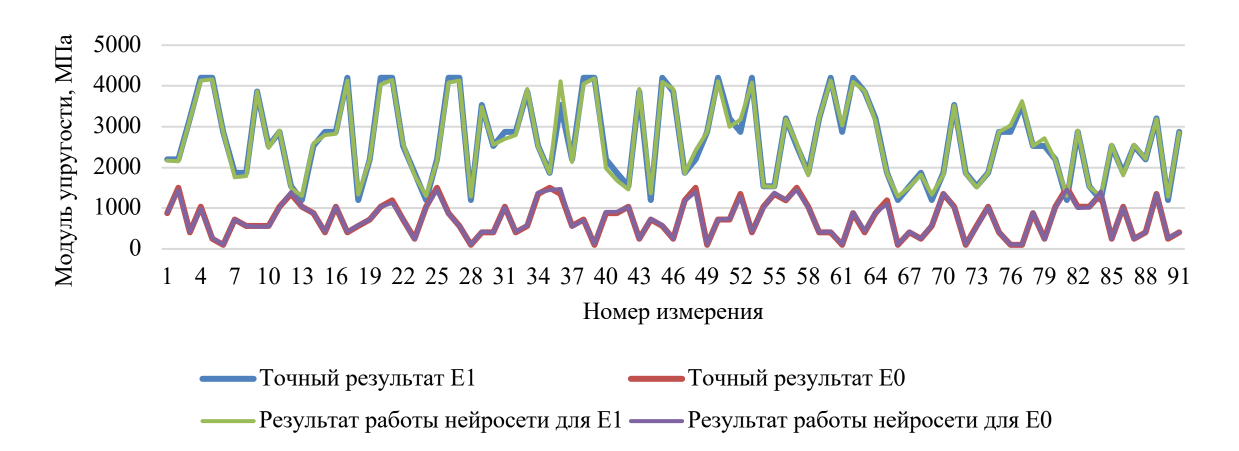


Рис. 4. Результат обучения нейронной сети при варианте 1 — «асфальтобетонный + щебеночный слой»

Что касается тестовых расчетов для вариантов 2 и 3, то в целом результаты вычислений близки к 1-му. На рис. 5 виден хороший результат обучения нейронной сети на всех слоях конструкции. Представленные значения получены на тестовом множестве случайной выборкой.

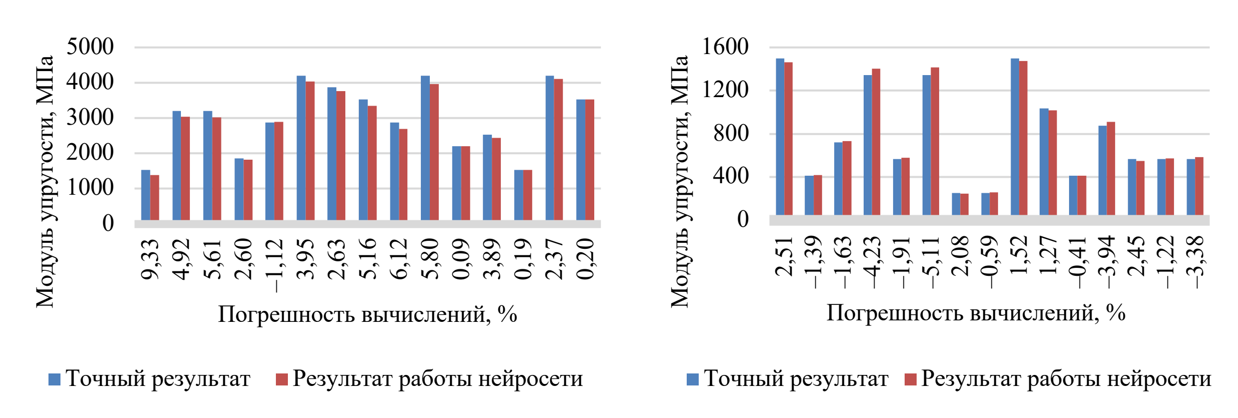


Рис. 5. Погрешность вычислений нейронной сети при варианте (1)

Графическое представление соотношения ожидаемого и полученного результата величины модуля упругости на рис. 5 свидетельствует о несущественных погрешностях при тестовом расчете слоев дорожной конструкции для случая 1.

Особое внимание стоит уделить тестовому расчету для варианта 4.

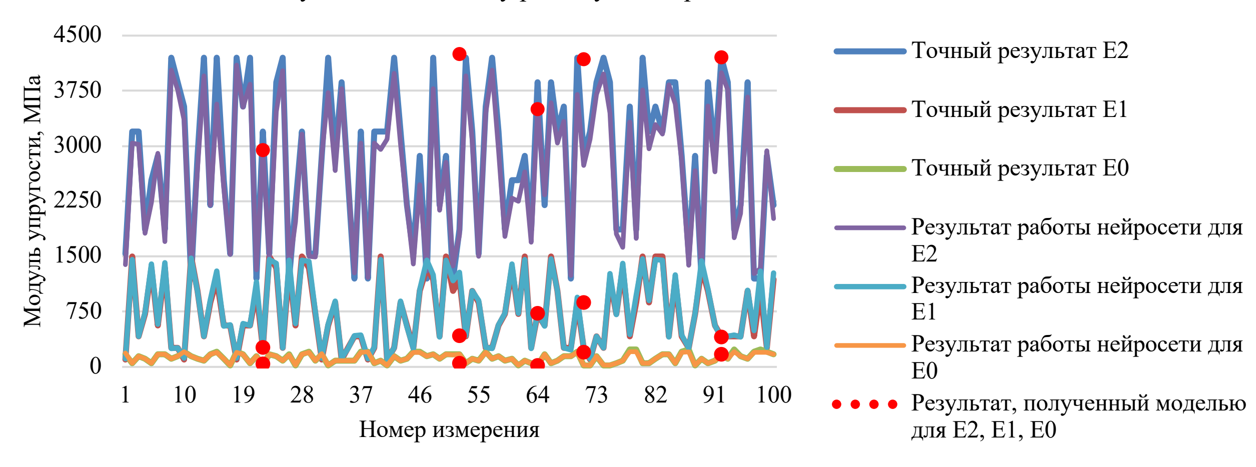
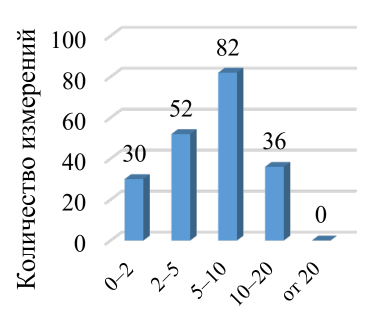
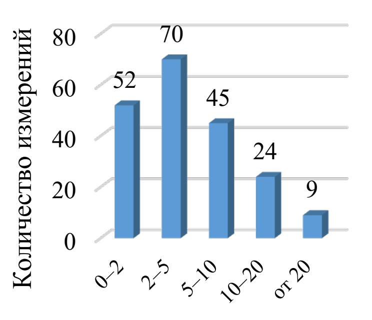


Рис. 6. Результат обучения нейронной сети при варианте 4 — «асфальтобетонный + щебеночный слой + грунт»

На рис. 7 представлено статистическое распределение погрешности вычислений нейросети. Отметим, что средняя погрешность большинства измерений — около 10 %. Однако в некоторых случаях наблюдается максимальное отклонение, близкое к 23 % (на гистограмме это группа 20 % и более).





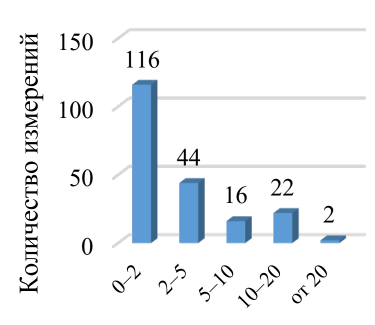


Рис. 7. Погрешность вычислений нейронной сети при варианте 4 — «асфальтобетонный + щебеночный слой + грунт»: *а* — при $E_2 \in [1200, 4200]$ МПа; *б* — при $E_1 \in [100, 1500]$ МПа; *в* — при $E_0 \in [20, 300]$ МПа

Из данных рис. 7 можно сделать выводы о точности вычислений нейронной сети на тестовом множестве. В первом случае (рис. 7 *а*) отмечаем, что из всего проверочного множества 41 % (82 измерения) имеют погрешность в пределах 5–10 %. Аналогичные показатели 52 измерений (26 %) — 2–5 %. В 30 случаях (15 %) зафиксированы значения 0–2 %. 36 измерений (18 %) дали результаты 10–20 %.

На рис. 7 *б* максимальный показатель — 70 значений для погрешностей 2–5 %. Согласно рис. 7*в* результаты вычислений модулей упругости грунта имеют наименьшую погрешность. Так, в пределах 0–2 % находится 116 значений. Это 58 % от тестового множества. 44 и 16 значений находятся в пределах 10 % погрешности (22 % и 8 % соответственно).

Обсуждение и заключения. Таким образом, нейросетевые технологии показали себя эффективным инструментом для определения механических свойств материалов дорожных конструкций. При решении обратной задачи отмечается высокая степень восстановления значений модулей упругости. Средняя погрешность вычислений не превышает 10 %.

Рассмотрены варианты обучения нейронной сети согласно значениям модулей упругости слоев. Зафиксированная в этих случаях погрешность связана в основном с недостаточным обучением сети. Для решения проблемы необходимо увеличивать количество данных для обучения.

Результаты применения нейросетевой технологии согласуются с экспериментальными данными, полученными после работы установки динамического нагружения FWD.

Список литературы

1. Федосов, А. В. Методы неразрушающего контроля / А. В. Федосов, Л. А. Гайнуллина // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2015. — Т. 11. — С. 73–78.

2. Kychkin, V. I. Not Destroying Dynamic Quality Monitoring of Road Clothes / V. I. Kychkin, V. S. Jushkov // Naukovedenie. — 2013. — Vol. 14. — P. 34.

3. Углова, Е. В. Оценка модулей упругости слоев дорожной одежды на стадии эксплуатации автомобильных дорог / Е. В. Углова // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — 2009. — № 2. — С. 170–178.

4. Углова, Е. В. Комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд с использованием методов неразрушающего контроля / Е. В. Углова, А. Н. Тиратурян, А. А. Ляпин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2016. — № 2. — С. 111–130. https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.2.08

5. Тиратурян, А. Н. Оценка деградации прочности нежестких дорожных конструкций на основе натурных измерений на участке автомобильной дороги М-4 «Дон» в п. Тарасовский / А. Н. Тиратурян, С. А. Ольховой // Инженерный вестник Дона. — 2017. — № 2. — С. 122.

6. Babushkina, N. Analysis of Neural Network Results Based on Experimental Data during Indentation / N. Babushkina, A. Lyapin, A. Kovaleva // E3S Web of Conferences. — 2020. — Vol. 224. — P. 01018. http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202022401018

7. Babushkina, N. Solving the Problem of Classification of Material Properties Using a Neural Network / N. Babushkina, A. Lyapin // Journal of Physics Conference Series. — 2021. — Vol. 2131. — P. 032084. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032084

8. Kulkarni, P.S. Artificial Neural Networks for Construction Management: A Review / P.S. Kulkarni, S. N. Londhe, M. C. Deo // Journal of Soft Computing in Civil Engineering. — 2017. — Vol. 1/2. — P. 70–88. HTTPS://dx.doi.org/10.22115/scce.2017.49580

9. Батурина, Н. Ю. Нейросетевые модели в задачах исследования строительных конструкций / Н. Ю. Батурина // Инженерный вестник Дона. — 2013. — № 4. — С. 201.

10. Elfaki, A. O. Using Intelligent Techniques in Construction Project Cost Estimation: 10-Year Survey / A. O. Elfaki, S. Alatawi, E. Abushandi // Advances in Civil Engineering. — 2014. — Art. 107926. https://doi.org/10.1155/2014/107926

11. Patel, D. A. Evaluation of Construction Projects Based on the Safe Work Behavior of Co-employees through a Neural Network Model / D. A. Patel, K. N. Jha // Safety Science. — 2016. — Vol. 89. — P. 240–248. https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2016.06.020

12. Максимова, О. М. Развитие и применение нейросетевых технологий для задач механики и строительных конструкций / О. М. Максимова // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2013. — № 8. — С. 81–89.

13. Газаров, А. Р. Преимущества использования искусственного интеллекта в сфере строительства / А. Р. Газаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — № 4. — С. 136–139.

14. Waziri, B. S. Artificial Neural Networks in Construction Engineering and Management / B. Sh. Waziri, K. Bala, Sh. A. Bustani // International Association for Sustainable Development and Management (IASDM). — 2017. — Vol. 6. — P. 50–60. http://dx.doi.org/10.7492/IJAEC.2017.006

15. Dell'Acqua, G. Using Artificial Neural Network and Multivariate Analysis Techniques to Evaluate Road Operating Conditions / G. Dell'Acqua, M. De Luca, D. Zilioniene / Journal of Risk Research. — 2018. — Vol. 21. — P. 679–691. https://doi.org/10.1080/13669877.2016.1264445

16. Elshamy, M. M. M. Evaluation of the Elastic Modulus of Pavement Layers Using Different Types of Neural Networks Models / M. M. M. Elshamy, A. N. Tiraturyan, E. V. Uglova // Advanced Engineering Research. — 2021. — Vol. 21. — P. 364–375. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-4-364-375

Поступила в редакцию 20.04.2022
Поступила после рецензирования 16.06.2022
Принята к публикации 16.06.2022

Об авторах:

Бабушкина Наталья Евгеньевна, аспирант кафедры «Информационные системы в строительстве» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, copybird@yandex.ru

Ляпин Александр Александрович, заведующий кафедрой «Информационные системы в строительстве» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, профессор, ScopusID, ORCID, lyapin.rnd@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. Е. Бабушкина — формулирование концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, выводы. А. А. Ляпин — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.